XV ENCAC Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído
XI ELACAC Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído
JOÃO PESSOA | 18 a 21 de setembro de 2019

O USO DE SISTEMAS VERTICAIS DE VEGETAÇÃO EM FACHADAS - ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO TÉRMICO

Aline Sayuri Takeda (1); Leonardo Marques Monteiro (2); Alberto Hernandez Neto (3)
(1) Arquiteta Urbanista, aline.takeda@usp.br,
(2) Doutor, Professor do Departamento de Tecnologia, leo4mm@usp.br, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética (LABAUT), Rua do Lago 876, São Paulo - SP, 05508-080, Tel.: (11) 3091-4538
(3) Doutor, Professor do Departamento de Engenharia Mecânica, ahneto@usp.br, Escola Politécnica da USP, Av. Professor Mello Moraes 2231, São Paulo - SP, 05508-900, Tel.: (11) 3091-9672

RESUMO
Sistemas com vegetação estão ganhando interesse dos projetistas como uma nova tecnologia de revestimento de fachadas em edifícios. Por isso, o presente estudo tem como objetivo verificar o desempenho térmico de fachadas verdes e paredes vivas e a influência do Índice de Área Foliar (LAI). O trabalho foi desenvolvido a partir de modelagem energética com EnergyPlus e OpenStudio de protótipos na cidade de Campinas. As análises foram realizadas em um dia de projeto determinado pela NBR 15575 e com base no modelo de conforto térmico adaptativo sugerido pela ASHRAE 55. As simulações mostraram que os efeitos metabólicos da vegetação podem contribuir até mais que o sombreamento. Em ambos os casos o LAI comprovou ser uma variável determinante no desempenho do sistema. Nos protótipos simulados a temperatura operativa reduziu até 2,7ºC com o uso de vegetação na fachada. Se por um lado existem desafios em simular os processos metabólicos de vegetações, são exatamente eles que amplificam o desempenho e tornam plantas diferentes de outros materiais.
Palavras-chave: parede verde, simulação, EnergyPlus, desempenho térmico.

ABSTRACT
Introduction - Systems with vegetation are gaining interest from designers as a new technology for facade cladding in buildings. This study has the objective of verifying the thermal performance of green walls and living walls and verify the influence of the Foliar Area Index (LAI). This work was developed using Energyplus and OpenStudio software to model prototypes at Campinas city. The analyzes were performed on a design day determined by Brazilian standard NBR 15575 and using the adaptative thermal comfort model suggested by ASHRAE 55. The simulation showed that metabolic effects of vegetation might contribute more than shading. For both direct and indirect green walls, LAI is a determinant variable in the performance of the system. In the simulated prototypes, the operative temperature decreased up to 2,7°C with vegetation facade systems. Although there are many challenges involved in simulating vegetation's metabolic processes, it is exactly what amplify the performance and differ plants from other materials.
Keywords: green walls, simulation, EnergyPlus, thermal performance.

1. INTRODUÇÃO

A vegetação como estratégia bioclimática é um elemento muito conhecido dos profissionais do meio acadêmico e da construção civil e nos últimos anos, sistemas com vegetação estão ganhando interesse dos projetistas como uma nova tecnologia de revestimento de fachadas em edifícios. Apesar disso, não há no país muitos exemplos do uso desse tipo de solução e há poucas pesquisas sobre fachadas ou paredes verdes realizadas no Brasil (SCHERER; FEDRIZZI, 2013). Nesse sentido, os estudos se concentram em teses na Universidade Estadual de Campinas como por exemplo o trabalho desenvolvido por Morelli (2016). Conteúdos científicos sobre o assunto podem ser encontrados nos anais de eventos como o Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, como por exemplo o artigo "Cortinas verdes: método experimental para quantificar a variação anual de sombreamento proporcionada pela vegetação" (SCHERER; FEDRIZZI, 2014) e o artigo "Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro" (MATHEUS et al., 2015).

O uso de vegetação em fachadas é uma das soluções possíveis para melhora o desempenho termoenergético de fachadas e para a implantação desse tipo de sistema existem diversas soluções construtivas disponíveis. Este fato se por um lado demonstram a relevância do assunto, também geram variações de terminologias. Tendo em vista esse contexto, é indispensável fixar a classificação dos sistemas verticais de vegetação. Nesse trabalho foram usadas as seguintes definições:

- Jardim vertical: consiste no uso de vegetações em vasos e floreiras apoiados no chão ou pendurados em paredes ou tetos.
- Paredes vivas: equivalem ao termo em inglês *Living Wall System,* ou *Green Wall System* (MEDL; STANGL; FLORINETH, 2017), concebido por Patrick Blanc na década de 1990. O sistema consiste em módulos compostos de substratos e vegetação que são fixados em estruturas metálicas na parede da edificação (MORELLI, 2016).
- Parede verde: é um sistema de revestimento vivo com planta trepadeira sobre a superfície de uma edificação, o termo utilizado na língua inglesa é G*reen Façade System* (MEDL; STANGL; FLORINETH, 2017). Esse sistema pode ser utilizado diretamente sobre a fachada com trepadeiras grampiformes ou indiretamente com um sistema de suporte da vegetação.

A definição do tipo de sistema deve estar acompanhada da escolha de uma espécie adequada para a implantação para garantir o crescimento da planta e para decidir o sistema de suporte, quando necessitar (MORELLI, 2016). A escolha do sistema e da espécie irá definir a frequência e custo de manutenção, os quais influenciam a sustentabilidade do sistema no ciclo de vida do edifício (PÉREZ et al., 2017).

Além de terem efeitos comprovados na saúde, o uso de vegetação integrada aos edifícios contribui na mitigação de efeitos da Ilha de Calor, no aumento da qualidade do ar, na criação de espaços livres, etc. No contexto urbano, a verticalização e a redução dos espaços livres leva à necessidade de buscar alternativas para a criação de espaços verdes (PERINI; ROSASCO, 2013).

Na escala do edifício a vegetação contribui no desempenho térmico da envoltória sombreando a superfície e criando uma camada extra de ar. Mazzali (2013) demonstrou como o uso de superfícies verdes reduzem a temperatura superficial da envoltória chegando a variações de 12 a 20ºC no clima mediterrâneo. Além disso, o uso de superfícies vegetais contribui com a redução do fluxo de calor entre o interior e o exterior, fato que indica o potencial desse tipo de solução na redução do consumo energético com aquecimento e resfriamento, os quais representam em um edifício cerca de um terço da energia consumida. Globalmente os edifícios utilizam mais da metade da eletricidade do planeta e o projeto e construção das envoltórias afeta o seu consumo energético em 20 a 60% (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2013). Existe, portanto, a necessidade emergencial de fazer as envoltórias mais eficientes energeticamente.

O uso de simulações computacionais já é uma prática comum durante o processo de projeto para determinação do desempenho termoenergético de edifícios. Porém, a modelagem e simulação de vegetações apresentam maior complexidade devido aos processos metabólicos envolvidos, tais como a fotossíntese e a evapotranspiração. Além disso, cada espécie vegetal possui características próprias, que podem variar ao longo do ano, tal como o Índice de Área Foliar, um dos principais fatores no desempenho termoenergético de vegetações em fachadas (PÉREZ et al., 2017). A somatória desses fatores demonstra a necessidade de mais estudos para maior entendimento dos mecanismos envolvidos e validar os modelos existentes.

2. OBJETIVO

O objetivo deste artigo é verificar com uso do modelo adaptativo o desempenho térmico de fachadas verdes e paredes vivas a partir de simulação computacional. Além disso, será feita análise da sensibilidade dos resultados com a variação do Índice de Área Foliar e outras variáveis do modelo de simulação adotado.

3. MÉTODO

O trabalho foi desenvolvido a partir de modelagem termoenergética dos protótipos utilizados na tese de doutorado "Desempenho de Paredes Verdes como estratégia bioclimática" (MORELLI, 2016). Para tanto o trabalho está dividido nas seguintes etapas principais: caracterização dos protótipos, tratamento de dados de medição, modelagem termoenergética, calibração, análises de sensibilidade.

3.1. Caracterização dos Protótipos

Os protótipos estão localizados na latitude 22°48´57´´S (sul), longitude 47°03´33´´O (oeste) e altitude de 640 metros do nível do mar no campus da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). O clima da cidade é classificado como tropical de altitude com média anual da temperatura do ar de 22,4°C (MORELLI, 2016). Dentro do campus os protótipos estão implantados num terreno de 22,00x28,26 metros e área de 621,72 m^2 de forma que não ocorra sombreamento nos protótipos entre si.

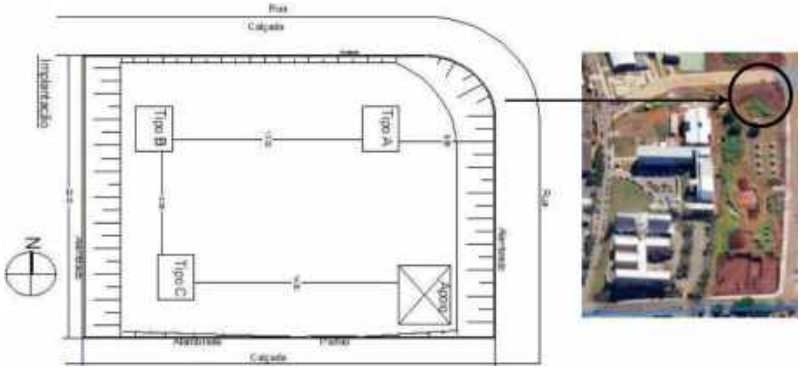


Figura 1 Implantação e terreno dos protótipos (Fonte: MORELLI, 2016)

Os protótipos são três unidades idênticas com as medidas externas de 2,80m x 3,80m x 3,00m (largura, comprimento e altura). Com área de 8,75 m^2 cada, os módulos foram construídos com blocos cerâmicos de 15 cm de espessura e reboco nas paredes interna e externa com espessura final de 18 cm na cor branca. A laje é de concreto com 10 cm de espessura e a cobertura é de telha de fibrocimento com 6 mm de espessura, 27% de inclinação e área total de 12 m^2. O piso interno é de cimento queimado e foi incorporada uma porta de madeira pintada de branco de 0,87m x 2,10m. Cada protótipo recebeu um tratamento diferente de fachada:

Protótipo A (jasmim-dos-açores): fachada verde indireta a 0,50 metros da parede.

Protótipo B (testemunha): sem cobertura vegetal.

Protótipo C (tumbérgia-azul): fachada verde direta.

Em visita ao campus em agosto de 2018 foi registrado o estado em que os protótipos se encontravam. No local os protótipos mantinham a vegetação utilizada por Morelli, porém a falta de manutenção permitiu que a grama ficasse alta e as trepadeiras crescessem de forma pouco controlada.



Figura 2 Protótipo A com trepadeira jasmim-dos açores



Figura 3 Protótipo B de controle



Figura 4 Protótipo C com trepadeira tumbérgia-azul

3.2. Tratamento de dados de medição

As medições realizadas por Morelli (2016) do inverno de 2015 até outono de 2016 foram utilizadas para calibração dos modelos. As variáveis ambientais coletadas foram: temperatura e umidade do ar interna (Registrador digital; Testo 175T2), temperatura de globo interna (esfera de cobre preto fosco com diâmetro de 152,4mm e emissividade de 0,95), temperatura superficial das paredes internas e externas (Sensor de temperatura superficial digital – termopares), velocidade do ar (termômetro de fio quente), radiação global (LI200X Pyranometer de Campbell Scientific), temperatura e umidade do ar externa (CS500 de Campbell Scientific), LAI (Índice de Área Foliar) das vegetações (LAI-ACCUPAR LP-80).

Os dados recebidos pela equipe da UNICAMP, originalmente realizados a cada 10 minutos, foram convertidos em medições horárias através de média simples no caso de temperaturas e através de integral no caso de radiações. Em janelas de medições foram adotadas as possíveis posturas: nos casos em que não ultrapassavam 3 horas foi adotada uma interpolação linear; nos casos em que era superior a 3 horas os valores nulos foram mantidos de modo a serem facilmente identificados nas análises seguintes.

3.3. Modelagem termoenergética

Foi desenvolvido um modelo a partir da caracterização dos protótipos nos programas SketchUp Make 2017 e OpenStudio. Foi considerado que cada protótipo possui duas zonas térmicas: a ZT1 equivale a parte acessível, enquanto a ZT2 é a zona entre a laje de concreto e a cobertura. As dimensões consideradas nos modelos são equivalentes as distâncias de eixo de uma parede para o eixo da outra no protótipo real. Foi considerado ainda que existe uma fresta em parte da parede da zona térmica 2 e que essa área corresponde a uma janela, que permite ventilação natural.

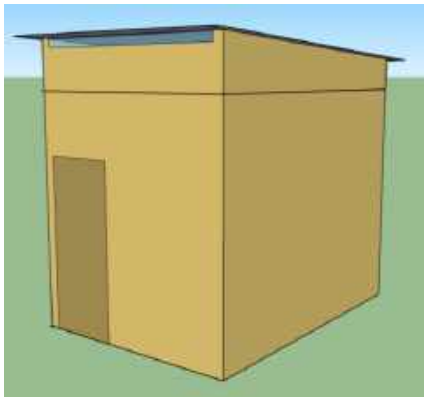


Figura 5 Modelo de controle no SketchUp

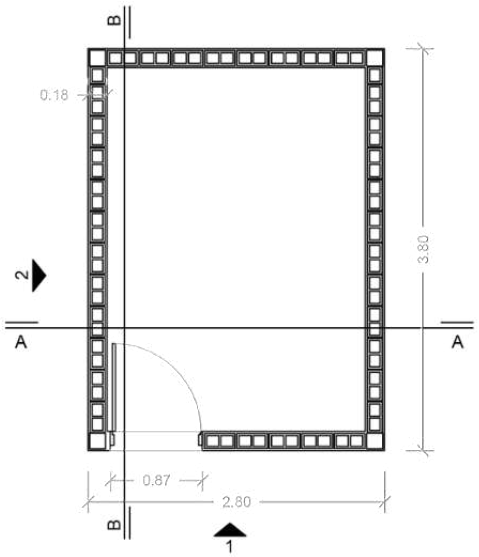


Figura 6 Planta dos protótipos com cotas das faces externas

Dados Climáticos

Os dados medidos pela estação meteorológica de temperatura do ar (ºC), umidade (%) e radiação direta (W/m^2) foram utilizados para construir o arquivo climático utilizado na simulação. O arquivo climático de referência cidade de Campinas, retirado do site institucional do EnergyPlus foi usado como base e inserido no *software* "ELEMENTS". Nessa base foram inseridos os dados medidos para criar as condições climáticas mais próximas possíveis daquelas do período de medição. Os dados substituídos foram: temperatura do ar externo, umidade externa, radiação normal e radiação difusa.

Materiais

Os materiais foram configurados de acordo com os valores de referência da NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo de transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações (ABNT, 2005). Para as paredes com blocos cerâmicos de 2 furos, foi feito o cálculo das propriedades do conjunto bloco cerâmico e argamassa de assentamento de acordo com a NBR 15220-2. A partir dessas propriedades foram configuradas as seguintes camadas em *"Constructions"* no OpenStudio do exterior para o interior dos protótipos:

- Cobertura: telhas de fibrocimento
- Piso interno: concreto queimado
- Lajes: reboco claro, concreto normal, reboco claro e argamassa de emboço
- Paredes: argamassa de emboço, reboco claro, bloco cerâmico 2 furos, reboco claro, argamassa de emboço

Tabela 1 Propriedades dos materiais de acordo com a NBR 15220-2: Desempenho térmico de edificações - Parte 2 e propriedades da parede de blocos cerâmicos de acordo com a mesma norma

	Massa aparente (Kg/m³)	**Condutividade Térmica (W/(m.K))**	**Calor específico (kJ/(kg.K))**	**Absortância (*Visible Absorptance*)**	**Emissividade (*Thermal Absortance*)**	**Transmissividade (*Solar Absortance*)**	**Espessura (m)**
Telhado de fibrocimento	2000	0,95	0,84	0,725	0,9	0,9	0,006
Concreto queimado	2300	1,75	1,00	0,725	0,9	0,9	0,08
Reboco Claro	1200	0,70	0,84	0,725	0,9	0,9	0,01
Concreto Normal	2300	1,75	1,00	0,725	0,9	0,9	0,10
Argamassa de emboço	2100	1,15	1,00	0,200	0,9	0,9	0,02
Cerâmica	2000	1,05	0,92	-	-	-	-
Argamassa de assentamento	2000	1,15	1,00	-	-	-	-
Bloco cerâmico de 2 furos	1359,13	0,303	0,92	0,700	0,8	0,7	0,14

Ventilação

Nos modelos foi considerada a renovação de ar natural em ambas as zonas térmicas através da configuração das *Thermal Zones* no Openstudio para ventilação natural. Para a Zona Térmica 1, considerou-se a existência de 1 renovação por hora devido a infiltração de ar externo através do vão abaixo da porta. Já para a Zona Térmica 2 obteve-se 3 renovações de ar por hora devido às aberturas na parte próxima a telha (Figura).

Protótipo de controle

Em primeiro momento foi elaborado o modelo do Protótipo B de controle (sem vegetação). As medidas utilizadas e imagens do modelo gerado são apresentadas na figura abaixo:

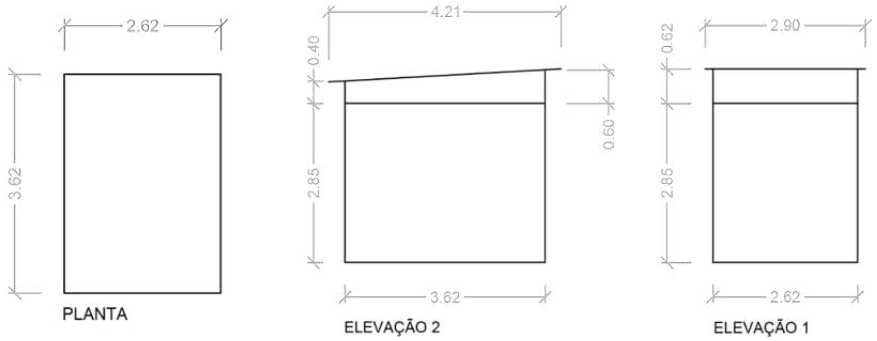


Figura 7 Esquema com as medidas utilizadas no modelo dos protótipos

Parede verde indireta

Para obter o modelo do Protótipo A foi adicionado ao modelo do Protótipo B um elemento de sombreamento semi opaco a 50 centímetros da parede. Para este elemento, foi configurado uma transmissividade calculada com base no Índice de Área Foliar, que é representada como a porcentagem da área de cobertura (sem incidência de radiação solar). A transmissividade, neste caso, é avaliada como 1 menos o LAI medido por Morelli (2016). No caso do Protótipo A, este valor é 0,51 e, portanto, a transmissividade adotada foi de 0,49.

Parede verde direta

Para modelar uma vegetação, do ponto de vista térmico, deve-se considerar a influência dela nas trocas de calor por convecção, uma vez que a geometria da vegetação gera alterações da velocidade do vento próximo a elas. Esse efeito é dado como uma resistência aerodinâmica (ra) e depende da velocidade do vento, do tipo de sistema implantado, da geometria das folhas e da densidade delas.

Além disso, é necessário considerar não só as trocas de calor por condução, irradiação e convecção, mas também através da evapotranspiração e fotossíntese (FLORES LARSEN; FILIPPÍN; LESINO, 2015). A primeira contribui na transferência de calor latente entre as folhas e o seu dossel através da perda de água, controlada pela abertura e fechamento dos estômatos. A capacidade de uma planta realizar esse processo depende da resistência à difusão de vapor dos estômatos para a atmosfera, chamada de resistência estomática

(rs). A velocidade desse fluxo de calor latente varia com a espécie, intensidade do sol, composição do solo e a diferença de pressão de vapor entre o estômato e a atmosfera (SAILOR, 2008). Dessa forma, ela tende a ser menor durante o dia e maior durante a noite. Ela também varia entre folhas pois aquelas mais iluminadas terão uma contribuição maior quando comparada às mais sombreadas (FLORES LARSEN; FILIPPÍN; LESINO, 2015). O processo de evapotranspiração é a combinação de dois efeitos simultâneos: a evaporação da superfície de solo ou de vegetação molhada e a transpiração das plantas.

Considerar tais mecanismos metabólicos e de alteração da velocidade do vento são os principais desafios de utilizar o Energy Plus como ferramenta de modelagem. Para considerar esses efeitos, é necessária uma modelagem prévia para cálculo de uma série de propriedades equivalentes que serão inseridos no programa, tais como emissividade, transmissividade, etc. (FLORES LARSEN; FILIPPÍN; LESINO, 2015)

Para tanto é proposto o uso de um fator x que equivale a razão de calor latente expelido pela planta sobre a radiação total absorvida (STEC; VAN PAASSEN; MAZIARZ, 2005). Stec et al. (2005) propôs uma equação simplificada para o cálculo de calor latente baseado na observação de que existe uma relação fixa entre a radiação absorvida e o calor latente expelido pela planta, conforme a Equação 1.

$$Lf = x(\alpha_f * I_s - qrad - G) \quad (1)$$

Onde Lf é o calor latente (W/m2), x é a razão de calor latente dissipado pela vegetação da radiação total absorvida, αf é a absortividade solar da vegetação (adimensional), Is é a radiação solar incidente incluindo a radiação de onda curta refletida pelo solo e superfícies do entorno (W/(m^{2}K)), qrad é o fluxo de radiação infravermelha entre a fachada verde e o entorno (W/m^2) e G é o calor absorvido pelo solo (W/m^2). Nessa equação o valor de x é adotado quase como uma constante de aproximadamente 0,6 ou 0,7, mas de acordo com Flores et al (2015) ele pode ser estimado. Ela propõe uma relação entre o valor de x, a temperatura do ar e a proporção rs/ra, que indicam diferentes condições de evapotranspiração.

ra >> rs : a umidade atravessa rapidamente a superfície das folhas mas não é facilmente evaporada, por isso cerca de 60 a 70% da energia absorvida é expelida pela planta como calor latente. (0,60 < x < 0,75)

ra ~ rs: situação intermediária onde 45 a 65% da energia absorvida é expelida pela planta como calor latente. (0,45 < x < 0,65)

ra << rs: a folha se mantém seca e a umidade é rapidamente evaporada sendo a maior parte do calor perdido por trocas de calor sensível. (0,23 < x < 0,40)

Através do balanço energético da vegetação, Flores (2015) obteve as Equações 2 a 6, que indicam o cálculo das propriedades equivalentes para a camada de planta a partir do parâmetro x.

$$(\rho c_p)' = (\rho c_p)_f \quad (2)$$

$$e' = e_f \quad (3)$$

$$\alpha' = \alpha_f(1 - x) \quad (4)$$

$$\varepsilon' = \varepsilon_f(1 - x) \quad (5)$$

$$\varepsilon_w{}' = \frac{\varepsilon_w(1 - x)}{1 - \varepsilon_w x} \quad (6)$$

Onde ρ é a densidade do material (kg/m^3), cp é o calor específico a pressão constante (J/kg.K), (ρcp)' é a capacidade térmica equivalente (J/m^{3}K), (ρcp)f é a capacidade térmica da folha (J/m^{3}K), e' é a espessura equivalente (m), ef é a espessura folha (m), α' é a absorvidade solar equivalente (considerada constante o ano todo), αf é a absortividade solar da folha (considerada constante o ano todo), ε' é a emissividade equivalente, εw' é a emissividade equivalente da parede, εw é a emissividade da parede e εf é a emissividade da folha.

Neste estudo o modelo de fachada verde direta foi obtido a partir do modelo de controle e adicionada uma camada externa as paredes, a qual foi configurada como um material de propriedades equivalentes como sugerido por Flores (2015). Tais propriedades foram calculadas a partir de valores de absortância, calor específico, condutividade térmica e densidade das folhas do livro "*Plants and Microclimate*" (JONES, 2013), considerando a luz do dia com comprimentos de onda entre 400 nm e 1100 nm.

Foi feita ainda a medição da emissividade das folhas do protótipo C em laboratório. O equipamento utilizado foi o AE1&RD1 com o adaptador ADP. Essa medição foi feita para uma camada única de folha sob superfície de madeira (εf = 0,722) e para um conjunto de 4 folhas sobrepostas sob a mesma superfície (εf = 0,576). Esse ensaio foi feito com folhas coletadas diretamente do protótipo C trazidas no mesmo dia.

O EnergyPlus não considera a radiação refletida do solo para elementos de sombreamento. Assim, seria necessário fazer alterações no modelo de cálculo de radiação solar utilizando um fator de forma "fictício" (FLORES LARSEN; FILIPPÍN; LESINO, 2015). Devido ao elevado nível de complexidade envolvido não foram considerados no trabalho alterações nas condições de contorno (Nu) e nem do fator de forma do modelo. A aplicação desses conceitos é sugerida para trabalhos futuros.

3.4. Calibração do modelo

A calibração do modelo foi realizada através da comparação dos resultados da simulação e das medições de temperatura do ar interna obtidas na tese de doutorado de Morelli (2016). O arquivo climático descrito no item anterior foi utilizado na calibração para criar as condições mais próximas possíveis daquelas do período de medição. Para o Protótipo C foi considerado o valor de x igual a 0,55 para obtenção das propriedades equivalentes. Esses valores estão resumidos na tabela a seguir:

Tabela 2– Propriedades térmicas equivalentes de parede verde

Propriedades	**Folha**	**Parede verde**
Espessura (m)	0,003	0,003
Absortância (*Visual Absorptance*)	0,200	0,200
Emissividade (*Thermal Absorptance*)	0,722	0,325
Transmissividade = 1 - LAI (*Solar Absorptance*)	N/A	0,1
Emissividade eq. Parede	N/A	0,802
Condutividade (W/ (m.K))	0,405	0,405
Densidade ρ (kg/m^3)	715	715
Calor específico cp (J/(kg.K))	3750	3750
Capacidade térmica equivalente ρ*cp (J/(m^3.K))	2681,25	2681,25
Capacidade térmica (J/ (m^2.K))	8,044	8,044

Os resultados de temperatura do ar interna do protótipo foram comparados com os resultados obtidos nas medições e calculado o erro quadrático médio. Na calibragem do modelo do Protótipo B (controle) foram utilizados dados de 61% do ano (225 dias), devido janelas de medição e medições que apresentaram erros. Como resultado foi obtido um erro quadrático médio de 1,6 ºC. Utilizando os mesmos parâmetros do protótipo B, foram considerados 265 dias do ano na análise e foi obtido o erro quadrático médio da temperatura do ar interna de 1,5 ºC. Para o protótipo C foram utilizados 274 dias de medição (75,14% do ano) e obteve-se um erro médio quadrático de 1,5 ºC. Considerando o nível de incerteza dos resultados de medição e da simulação, o erro obtido foi considerado razoável e, portanto, o modelo calibrado.

3.5. Análises de sensibilidade

Com o modelo calibrado, foram realizadas análises para verificar a influência do Índice de Área Foliar (LAI) nos resultados para as paredes verdes indiretas (Protótipo A) e direta (Protótipo C). Foi utilizado como base o dia típico de verão de projeto para a cidade mais próxima de Campinas disponível no Anexo A da NBR15575-1 Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais (ABNT, 2013). Com isso foi definido o dia de projeto para a cidade de São Paulo com as seguintes características:

Tabela 3 – Características de dia típico de verão
(Fonte: NBR15575-1 Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais)

Cidade	**São Paulo**
Temperatura máxima diária (°C)	31,9
Amplitude diária de temperatura (°C)	9,2
Temperatura de bulbo úmido (°C)	21,3
Radiação solar (Wh/m^2)	5180
Nebulosidade décimos	6

No programa OpenStudio foi adotado o dia 21 de fevereiro e para a radiação foi utilizado o modelo da *ASHRAEClearSky* com *SkyClearness* de 0,55 de modo que a radiação total fosse de 5210 Wh/m^2. Foram feitas configurações adicionais com base em dias típicos padrão do programa em parâmetros não padronizados por norma, são eles: pressão do ar de 92.043 Pa; velocidade do vento de 3,1 m/s; direção do vento de 330. Os sistemas foram avaliados comparativamente do ponto de vista de conforto térmico a partir do modelo adaptativo de temperatura operativa neutra. Este modelo considera o equilíbrio térmico do corpo e o ambiente através da termorregulação fisiológica (MONTEIRO; ALUCCI, 2008) e é o índice adotado pela ASHRAE55 para avaliação térmica de ambientes condicionados naturalmente (ASHRAE, 2017).

Índice de Área Foliar

A influência do Índice de Área Foliar foi verificada para os modelos desenvolvidos de fachada verde indireta por meio da variação da transmissividade configurada na aba *"Schedule"* da ferramenta de simulação

Energy Plus. Já para a fachada verde direta foi alterado o valor de absortância solar da camada de vegetação considerando-a diretamente relacionada ao valor de LAI. As demais variáveis foram adotadas como constantes, incluído o valor de x de 0,55 utilizado na calibração. Os dados de saída da simulação foram: temperatura operativa e temperatura do ar interno. Essa análise foi feira para os valores de LAI de 1; 0,5 e zero; os quais equivalem a transmissividade de zero; 0,5 e 1 respectivamente.

Sensibilidade para x

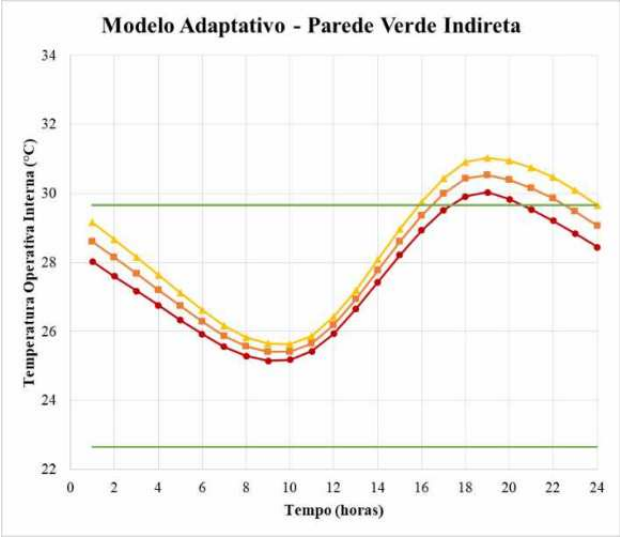
Foi feito um segundo estudo para verificar a sensibilidade do modelo de paredes verdes diretas (Protótipo C) para diferentes valores de x considerando os 3 valores de LAI estudados na análise anterior. Valores de x reduzidos indicam uma evaporação mais rápida, situação mais próxima a valores de LAI menores, pois com menos folhas há menos retenção de umidade e a evaporação tende a ser mais rápida. Valores de x mais elevados indicam situações nas quais a evapotranspiração é dificultada pela alta umidade do ambiente e baixa velocidade do ar. Por isso eles descrevem melhor situações onde a densidade de folhas é maior e, portanto, o LAI é mais elevado. Considerando os intervalos estudados por Flores et. Al (2015) foram selecionados 4 valores de x: 0,70; 0,55; 0,3 e zero. A tabela a seguir resume as propriedades dessas simulações de emissividade (*Thermal Absorptance*):

Tabela 4 - Propriedades alteradas para análise de sensibilidade do fator x

x	**0**	**0,3**	**0,55**	**0,7**
Emissividade parede verde	0,722	0,505	0,325	0,217
Emissividade equivalente parede	0,900	0,863	0,802	0,730

4. ANÁLISE DE RESULTADOS

4.1. Índice de Área Foliar



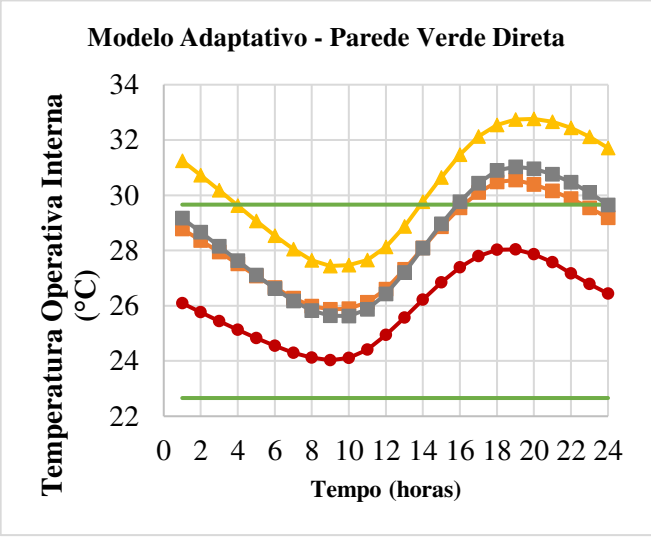




Figura 8 Temperatura Operativa na Zona Térmica 1 com sistema de parede verde indireta no dia de projeto

Figura 9 Temperatura Operativa na Zona Térmica 1 com sistema de parede verde direta no dia de projeto

Na simulação de parede verde indireta, a vegetação é tratada como um elemento de sombreamento. Observe que a curva de LAI 0 se sobrepõe a curva de controle, isso ocorre porque o modelo considera a parede verde como um elemento transparente. O gráfico da Figura 8 mostra diferenças de temperaturas operativas de cerca de 0,5°C em função do aumento do LAI. Na situação sem vegetação na fachada, há o aumento da porcentagem de horas de conforto de 67% para 75% quando o LAI de 0,5 é atingido. Para o LAI igual a 1 atingimos o limite de 88% das horas do dia em conforto.

Já para a simulação de parede verde direta, os resultados apresentaram diferenças maiores de temperatura para os diferentes valores de LAI, o que demonstra o impacto da vegetação no desempenho térmico e a importância do metabolismo da vegetação na simulação. Nesse caso a situação com LAI nulo não equivale a situação de controle devido ao uso de propriedades equivalentes da camada mais externa da parede. Nessa situação 42% das horas do dia ficaram dentro dos limites de 80% de satisfação de acordo com o modelo adaptativo. Já nas situações com LAI de 0,5 e 1 essa porcentagem aumenta para 75% e 100%. O

modelo de controle teve resultados muito próximos da análise com LAI de 0,5, o que demonstra que o modelo não representa bem o comportamento térmico da vegetação nessas circunstâncias. Isso provavelmente ocorreu por conta da fixação do fator de correção x, que será melhor estudado a seguir.

4.2. Sensibilidade para x

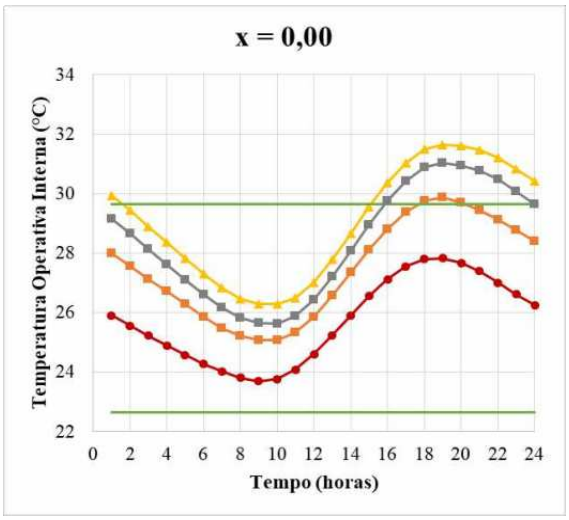


Figura 10 Temperatura Operativa na ZT1 com sistema de parede verde direta adotando x = 0,00

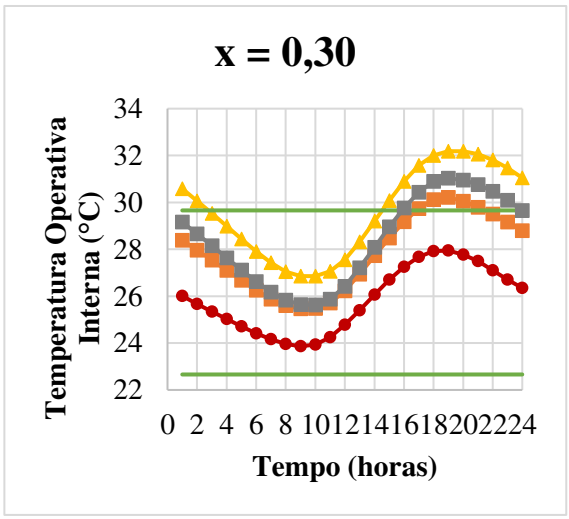


Figura 11 Temperatura Operativa na ZT1 com sistema de parede verde direta adotando x = 0,30

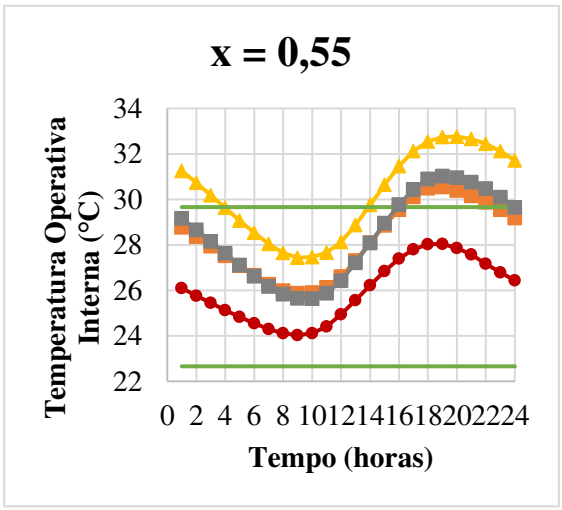


Figura 12 Temperatura Operativa na ZT1 com sistema de parede verde direta adotando x = 0,55

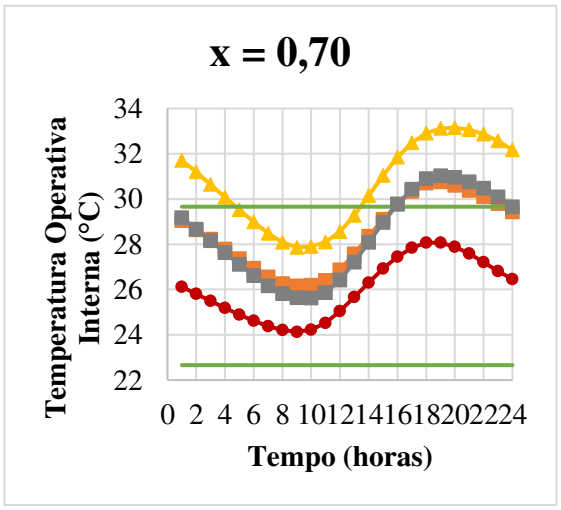


Figura 13 Temperatura Operativa na ZT1 com sistema de parede verde direta adotando x = 0,70





Tabela 5 – Resultados resumidos

Situação típica	**Temperatura operativa (ºC)**	**Percentual em conforto**
Controle	30,9	63%
X = 0,00 e LAI = 0,0	31,5	58%
X = 0,30 e LAI = 0,5	30,3	79%
X = 0,70 e LAI = 1,0	28,3	100%

Comparando os gráficos observa-se que, para valores de LAI mais elevados, a sensibilidade aos valores de x são reduzidos, pois praticamente não houve alterações dos resultados para o LAI de 1. Esse

comportamento é coerente uma vez que a camada mais densa de vegetação reduz a influência da emissividade da camada subsequente.

Conforme o valor de x foi reduzido até zero a influência do LAI também foi reduzida, pois os valores de temperatura se aproximam nas curvas apresentadas nas Figuras 10 a 13. Quando o valor de x e do LAI foram fixados em zero, o resultado deveria se aproximar das temperaturas do protótipo de controle, sem vegetação. Verificou-se que ocorreu uma diferença média de 0,65°C, o que indica o grau de incerteza dos resultados e limitações desta pesquisa, necessitando-se, assim, de novos estudos para verificação. As simulações mostraram que os efeitos metabólicos da vegetação podem contribuir até mais que o sombreamento. Enquanto a redução atingida pelo sistema de fachada verde indireta alcançou a redução de 1ºC, o sistema direto chegou à redução de até 2,69ºC na temperatura operativa.

5. CONCLUSÕES

O uso de um elemento que nasce, cresce e morre como elemento de fachada é um desafio para a engenharia civil e para a arquitetura. As análises de sensibilidade demonstraram a complexidade dos processos envolvidos, quanto pela dificuldade em padronizar ou parametrizar um ser vivo com tantas espécies e que se mantém em constante mudança.

Por outro lado, são exatamente tais processo que amplificam o desempenho e tornam plantas diferentes de outros materiais. Comparando as simulações que consideram e não consideram o metabolismo da vegetação os resultados verificou-se a redução da temperatura máxima do ar interno no dia de projeto em até 1,69ºC. Esse resultado demonstra a relevância do metabolismo no desempenho da vegetação. O presente trabalho representa um pequeno passo diante de uma longa caminhada em busca de espaços mais sustentáveis, saudáveis e confortáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2:** Desempenho térmico de edificações. Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações, n. 1, p. 1–34, 2005.

_____. **NBR 15575-1:** Edificações habitacionais - Desempenho Parte 1: Requisitos gerais. 2013.

ASHRAE - AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, **Standard 55**-2017, Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2017.

FLORES LARSEN, S.; FILIPPÍN, C.; LESINO, G. Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. **Solar Energy**, v. 121, p. 56–67, 2015.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Technology Roadmap. Energy efficent building envelopes**. [s.l: s.n.].

JONES, H. G. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology. **Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology**, p. 1–407, 2013.

MATHEUS, C. et al. Desempenho térmico de envoltórias vegetadas em edificações no sudeste brasileiro. **Ambiente Construído**, v. 16, n. 1, p. 71–81, 2015.

MAZZALI, U. et al. Experimental investigation on the energy performance of Living Walls in a temperate climate. **Building and Environment**, v. 64, p. 57–66, 2013.

MEDL, A.; STANGL, R.; FLORINETH, F. Vertical greening systems e A review on recent technologies and research advancement. **Building and Environment**, v. 125, p. 227–239, 2017.

MONTEIRO, L. M.; ALUCCI, M. P. Adaptive Model of Neutral Operative Temperature for the Evaluation of Transitional Spaces Resumo Simulações. **São Paulo Nutau**, n. 1, 2008.

MORELLI, D. D. DE O. Desempenho de paredes verdes como estratégia bioclimática. **Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia, Arquitetura Urbanismo**, p. 1–161, 2016.

PÉREZ, G. et al. Green facade for energy savings in buildings : The influence of leaf area index and facade orientation on the shadow effect. **Applied Energy**, v. 187, p. 424–437, 2017.

PERINI, K.; ROSASCO, P. Cost e benefit analysis for green façades and living wall systems. **Building and** Environment, v. 70, p. 110–121, 2013.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 8, p. 1466–1478, 2008.

SCHERER, M. J.; FEDRIZZI, B. M. Determinação Do Percentual De Área De Abertura Na Fachada (PAF) em Proteções solares com vegetação - cortinas verdes. **ENCAC 2013**, n. 1, p. 1–10, 2013.

SCHERER, M. J.; FEDRIZZI, B. M. Cortinas Verdes : Método Experimental Para Quantificar a Variação Anual De Sombreamento Proporcionada Pela Vegetação. **ENCAC 2014**, n. 1, p. 1–10, 2014.

STEC, W. J.; VAN PAASSEN, A. H. C.; MAZIARZ, A. Modelling the double skin façade with plants. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 5, p. 419–427, 2005.